减少压缩机活塞杆密封系统中的甲烷排放量

REDUCING METHANE EMISSIONS FROM COMPRESSOR ROD PACKING SYSTEMS

1 内容提要

在美国天然气工业中，处于运转状态的往复式压缩机数量超过 29 000 台，平均每台压缩机有 4 个气缸，即有 160 000 个活塞杆密封系统处于在役状态。这些系统每年向大气中排放的甲烷量超过 438 亿立方英尺，是天然气压缩站中最大的排放源之一。

在正常工作条件下，所有的密封系统都会发生泄漏，其泄漏量取决于气缸压力、密封部件的配合和校直程度、密封环和活塞杆轴承的磨损量。一个校直和配合程度较高的新密封系统，其甲烷排放量大约为 11～12 标准立方英尺/小时。随着系统使用年限的增加，从密封环和活塞杆轴承处泄漏的甲烷量将逐渐增加。一个天然气 STAR 合作伙伴报道，在压缩机活塞杆处测得的甲烷排放量达到 900 标准立方英尺/小时。

利用公司具体的财务目标和监测数据，合作伙伴可以确定出一个可接受的、合理的并且更换密封环和活塞杆在经济上是很合算的甲烷排放量。计算和使用这个“经济的设备更换界限”的好处在于这个方法将甲烷减排量和成本节省量考虑在内。使用这种方法，一个天然气 STAR 合作伙伴每年节省的费用高达 100 000 美元。经济的设备更换界限方法同样还可为公司经营带来更多的好处，包括延长现有设备寿命、提高营运效率和长期节省营运成本等。

泄漏源	年气体损失体积（千立方英尺）	减少气体损失的方法	节省气体的价值（美元/年）	设备成本（美元/年）	回收期
压缩机活塞杆密封	865[1]	合理地更换密封环和活塞杆	2 595[2]	400[3]	2 个月

[1] 国际管线研究委员会（1999）。

[2] 气体价格按 3 美元/千立方英尺计算。

[3] 密封环每三年更换一次，而不是工业上平均的每四年更换一次，每次更换费用为 1 200 美元。

2 技术背景

在天然气工业中使用的往复式压缩机在正常运转过程中都会出现甲烷泄漏现象。甲烷泄漏频发的地方包括位于压缩机上的法兰、阀门和配件。然而，气体损失量最大的地方是活塞杆密封系统。

密封系统用来使活塞杆周围保持严密密封，以防止压缩气缸中的高压压缩气体发生泄漏，同时还要允许活塞杆能自由移动。图 1 所示为一个典型的压缩机活塞杆密封系统。

压缩机活塞杆密封系统由一系列活动的密封环组成，这些密封环装配在轴承周围形成一个严密密封以防止甲烷泄漏。密封环一般通过循环润滑油的方式进行润滑，以减少磨损、帮助密封部件和散发热量。其他的冷却方法包括空气冷却、水套冷却和密封箱内循环冷却液冷却。密封环由一组密封皮碗固定在预定位置处。通常一对密封环使用一个密封皮碗，并通过一个环绕弹簧来确保与轴承之间保持紧密配合。密封皮碗和密封环数量因情况而异，这主要取决于压缩腔压力。密封箱尾部的“鼻状垫圈”可防止密封皮碗周围发生泄漏。

在最好的条件下，安装在光滑且高度校直的轴承上的新的密封系统，预计其泄漏量最少可达到

11.5 标准立方英尺/小时。密封部件配合程度、校直程度以及磨损程度均可导致较高的泄漏速度。甲烷泄漏通常发生在以下四个区域：

★ 在密封箱周围通过鼻状垫圈发生泄漏。

★ 在密封皮碗之间发生泄漏，密封皮碗之间通常是金属－金属密封。

★ 当活塞杆前后运动时，由于皮碗槽轻微运动，在密封环周围发生泄漏。

★ 在密封环和轴承之间发生泄漏。

泄漏的气体通过法兰上的通风口排入大气中。通过恰当的监测和合理地安排密封环和活塞杆更换计划能减少甲烷排放量。新型密封环材料和密封箱结构正不断涌现出来，这将进一步减少甲烷排放量。

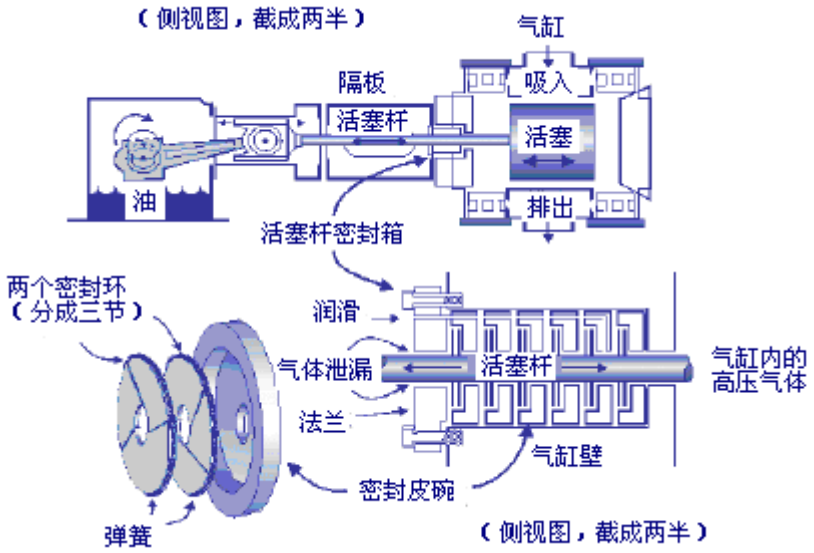

图 1 典型的压缩机活塞杆密封系统

3 经济和环境效益

定期监测和更换压缩机活塞杆密封系统能大大减少向大气中的甲烷排放量并节约大量资金。例如，传统的青铜金属密封环每三到五年就会磨坏并需要进行更换。当密封恶化时，泄漏速度会增加，在该泄漏水平下频繁更换密封环在经济上被认为是合理的。此外，频繁更换密封环事实上还可以延长压缩机活塞杆的寿命。制定并执行监测和设备更换计划的合作伙伴们能获得以下好处：

★ 减少甲烷排放量。

★ 从较低的泄漏速度中节约大量甲烷。

★ 延长压缩机活塞杆的使用寿命。

4 决策步骤

公司可以通过以下简单的五步来决定合理的设备更换计划：

第 1 步：监测并记录基准线密封泄漏量和活塞杆磨损量数据

确定基准线泄漏速度并监测活塞杆磨损量可以使天然气 STAR 合作伙伴及时跟踪泄漏的增加情况并评估更换密封环和活塞杆的经济效益。

密封箱法兰上的排气孔为气体泄漏到大气提供了一个通道。然而，气体也可以沿着活塞杆和/或

密封箱末端的垫片流出，绕过密封皮碗进入隔板中。因此，如果可能的话，泄漏量测量应包含从密封皮碗和垫片泄漏出来的甲烷量。有些系统中密封皮碗和垫片的排气口是相通的，而有些系统则是独立的。

气体泄漏量可用手持式或固定式测量装置进行测量。在测量开始之前，必须检查密封通风口系统。若不考虑排出到隔环中的气体漏失量，则可能导致将整个密封系统的漏失量低估 40%，这样会影响到经济决策过程。

经济地更换密封设备和活塞杆的五个步骤：

（1）监测并记录基准线密封泄漏量和活塞杆磨损量数据
（2）比较当前和开始的泄漏速率来决定预期的泄漏减少量
（3）评估更换费用
（4）决定经济更换界限
（5）费用合理时更换密封和活塞杆

安装好新的密封装置（或新的活塞杆和密封装置）后，及时进行测量是很重要的。这个测量结果可以作为新密封系统的基准线，也可以作为其它具有相同类型、尺寸、压力和活塞杆使用寿命的气缸和压缩机的缺省的基准线。安装好密封环之后，合作伙伴需要定期监测和记录泄漏速度并将工作条件（压力、润滑、温度）和密封环的整个寿命联系起来，监测和记录频率一般是每月或每季度一次。

在更换轴的过程中，通过记录轴的尺寸以及活塞杆和密封环接触地方的表面粗糙度，可定期监测活塞杆的状态。活塞杆磨损速度远慢于密封环，其寿命大约为 10 年。当活塞杆校直程度很差时，活塞杆会被磨成椭圆状或圆锥状，这将影响密封环与轴承之间的配合（进而影响密封的严密性）和密封环的磨损速度。椭圆形轴不仅密封性能差、泄漏量多，而且还会引起轴的不均匀磨损，进而缩短活塞杆和密封环的寿命。活塞杆磨损引起的泄漏量由每次更换密封环后测得的基准线泄漏速度的变化水平来确定（假设工作条件和密封环类型相同）。基准线泄漏量的增加幅度可用来确定更换活塞杆的经济界限（见第 4 步）。

第 2 步：比较当前和初始的泄漏速度来确定预期的泄漏减排量

利用第 1 步获得的监测数据，将基准线泄漏量测量结果与当前的泄漏速度进行对比，进而确定在当前的泄漏水平下是否需要更换密封系统或活塞杆。表 1 说明了对比过程。

表 1 当前和初始泄漏速度对比

已知：

IL＝上一次更换密封环活塞杆时的初始泄漏速度

CL＝当前泄漏速度

LRE＝预期的泄漏减少量

计算：

LRE＝CL-IL

例如，如果当前测得的密封环泄漏速度为 100 标准立方英尺/小时，上一次更换后的初始泄漏速度为 11.5 标准立方英尺/小时，那么预期的泄漏减少量为：

LRE＝100 标准立方英尺/小时-11.5 标准立方英尺/小时

LRE＝88.5 标准立方英尺/小时

为了进行更精确的分析，合作伙伴应该计算“预期泄漏减少量”(LRE)，即计算分别安装新的密

封系统和活塞杆设备所带来的气体减排量。对于仅安装新的密封环这种情况，当确定其 LRE 时，因为最后一次更换密封环是由密封环磨损引起的，所以假定所有的漏失量都会增加。当确定更换活塞杆和密封环的 LRE 时（新密封环总是和新活塞杆一起安装），要使用该压缩机上一次更换活塞杆后立即测得的初始泄漏速度。对于没有历史数据的个别压缩机，可使用其他有着类似工作条件的类似压缩机的数据来确定其基准值（初始泄漏量）。

第 3 步：评估设备更换费用

更换密封环和活塞杆的费用随压缩机的不同而不同。对于更换密封环来讲，评价参数包括压缩机气缸的数量和更换密封环的型号。一个天然气 STAR 合作伙伴报道，对于一个装配有 8～10 个密封皮碗（由聚四氟乙烯或钼材料制成）的、长度为 3 英寸的活塞杆来讲，每个密封皮碗的价格在 100～125 美元之间，因此整个费用大约在 800～1 250 美元之间。另一个资料报道，一组密封环的价格大约在 500～800 美元之间，如果将密封皮碗和密封箱包括在内，则其价格大约在 1 500～2 500 美元之间。影响活塞杆更换费用的因素包括活塞杆尺寸和活塞杆型号。活塞杆价格估计在 1 800～3 500 美元之间。若采用特殊涂层，如陶瓷、碳化钨或铬，则其价格会增加 1 000 美元甚至更多，一些活塞杆的价格甚至高达 9 000～10 000 美元。

安装费用同样也是变化的，这取决于安装位置和设备更换过程中遇到的困难程度。合作伙伴和生产商们估计，安装费用和设备费用大约相等。一个合作伙伴购买和安装一套密封环所花的费用平均为 1,050 美元。合作伙伴们发现，与安装密封环和活塞杆的人工费用相比，监测和测量泄漏所花的费用是微不足道的。

第 4 步：确定经济的设备更换界限

根据第 1 步到第 3 步获得的数据，合作伙伴就能确定出一个“经济的设备更换界限值”，该值可以定义为一个特定的甲烷泄漏量值，在该值条件下更换密封环和活塞杆对合作伙伴来讲在经济上是比较合算的。根据公司投资评价标准和特定的位置特征，合作伙伴们已经得到了计算这个界限值的几种方法。

一个简单的方法是利用现金流动贴现原则来计算经济的设备更换界限。利用以下方程，合作伙伴们可计算出密封系统和活塞杆的经济更换界限值：

$$\text{经济更换界限值(scfh)}=\frac{CR\times DF\times 1000}{(H\times GP)}$$

式中：CR 为设备更换费用，美元；DF 为折现因子，%；H 为压缩机每年运转时间，小时；GP 为气体价格，美元/千立方英尺。

折现因子为相等年收益下的投资回收期，由下式进行计算：

$$DF=\frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n-1}$$

式中，i 为折现率或公司基准回收率，小数；n 为选定的投资回收期。利用这个方程，当折现率为 10%（i=0.1）、投资回收期为 1 年（n=1）时，折现因子为 1.1；投资回收期为 2 年时（n=2），折现因子为 0.576；等等。

表 2 给出了一个贴现回收期的例子。表中数据说明了新的密封环系统在 1 年、2 年等时间内为偿还投资所必须的 LRE。表 2 中，更换密封环的费用为 1 200 美元，若泄漏量减少值为 55 标准立方英尺/小时，则一年内就可以收回投资；若泄漏量减少值为 29 标准立方英尺/小时，则两年内就可以收回投资；等等（贴现率取 10%）。因此，如果合作伙伴的内部投资标准取投资回收期为 2 年，那么合作伙伴应将密封环的经济更换界限值确定为 29 标准立方英尺/小时。换句话说，当更换密封环的

预期泄漏减少量（LRE）达到 29 标准立方英尺/小时时，合作伙伴应更换密封环。

与密封环相似，为了证明一个新活塞杆系统的投资是合理的，则需要通过确定所需的泄漏减少量，才能确定出更换活塞杆的经济更换界限值。根据以上步骤，将活塞杆费用替代更换费用（CR）就可确定出该经济更换界限值。

表 2 密封环的经济更换界限

预期泄漏减少量（标准立方英尺/小时）	投资回收期[1]（年）
55	1
29	2
20	3
16	4
13	5
[1]假设密封环更换费用为 1 200 美元，气体价格按 3 美元/千立方英尺计算，压缩机工作时间为 8 000 小时/年	

确定好经济更换界限值之后，合作伙伴应确定因设备更换带来的甲烷排放量。当前的泄漏量（CL）测量结果并未将密封环和活塞杆磨损引起的泄漏量区分开来。然而在某些时候，初始泄漏量（IL）测量结果表明基准线泄漏速度在逐渐增加，这说明活塞杆有磨损。合作伙伴们应测量并跟踪初始泄漏量（IL）的变化以确定由于活塞杆老化所带来的排放量。合作伙伴们同时还需要确定一个基准线，通过该基准线可对比与活塞杆相关的泄漏问题。这项工作可以通过在安装活塞杆后立即进行测量来完成，也可以通过对比安装有新活塞杆和密封系统的类似设备的测量结果来完成。一旦确定了这个基准线，合作伙伴可以利用现金流动贴现方法来确定指示需要更换活塞杆的泄漏量。

表 3 利用与表 2 相同的方法提供了更换密封环和活塞杆的 LRE 经济更换界限。这个例子中更换活塞杆和密封环的费用为 8 200 美元。表中数据表明，如果公司希望在 1 年内收回投资，则预期泄漏减少量（LRE）应为 376 标准立方英尺/小时；如果希望 3 年内收回投资，则预期泄漏减少量（LRE）为 137 标准立方英尺/小时（贴现率取 10%）。

表 3 活塞杆和密封环的经济更换极限

预期泄漏减少量（标准立方英尺/小时）	回收期[1]（年）
376	1
197	2
137	3
108	4
90	5
[1]假设密封环更换费用为 1 200 美元，活塞杆更换费用为 7 000 美元，气体价格按 3 美元/千立方英尺计算，压缩机工作时间为 8 000 小时/年。	

注意：校直程度差的活塞杆或配合程度差的密封环会导致当前测量的泄漏量较高，进而得到较高的预期泄漏减少量（LRE）。这个结果并不表明需要更换活塞杆，而是需要重新配合密封环或重新校直活塞杆。在确定活塞杆初始泄漏量（IL）增加值超过基准线的原因是否是由活塞杆磨损引起的时，监测活塞杆尺寸（如锥度、圆度、刮痕和表面粗糙度）是很有必要的。

第 5 步：当评价结果在经济上合算时更换密封系统和活塞杆

监测排放量并在经济更换界限下更换磨损的活塞杆和密封环会立即降低甲烷排放量和压缩机燃料费用。合作伙伴们应将压缩站数据与更换界限值数据进行对比，当实际的预期泄漏排放量（LRE）

等于或超过经济更换界限时，合作伙伴需要更换密封环和活塞杆。我们鼓励合作伙伴选择合适的经济更换界限值以最大程度地减少甲烷排放量。

合作伙伴的经历

Consumers Energy 公司更换了 15 台压缩机上的磨损的活塞杆和密封环，估计从减少气体泄漏中节省的费用高达 21 000 美元（每年减少 7 000 千立方英尺的泄漏量，气体价格按 3 美元/千立方英尺计算），更换所有密封环（包括材料和人工）的费用为 17 000 美元，投资回收期不到一年。

5 其它选择方案

天然气 STAR 项目的合作伙伴们还未就通过更换压缩机活塞杆密封设备所能达到的标准减排量达成一致意见。影响潜在的节省费用的因素很多，包括气缸压力、密封配件的配合和校直程度、密封环和活塞杆轴承的磨损量以及公司内部决策标准。合作伙伴都赞同，确定更换密封环和活塞杆的经济更换界限值是减少往复式压缩机中甲烷排放量的一个实用的方法。

★ **密封环。**碳浸聚四氟乙烯逐渐替代青铜金属密封环。一个供货商强调，两者的价格相差不大，且聚四氟乙烯密封环的使用寿命比传统青铜密封环的使用寿命要延长一年。然而，其他因素（包括正确的安装、冷却、润滑）在密封环使用期限内扮演着更重要的角色。

★ **提高活塞杆材质等级。**现场应用证实，采用碳化钨涂层的新型的或现有的活塞杆可通过减少磨损量来提高其使用寿命，对于“静密封”装置来讲，这种涂层同样还能提高其工作效率（见 “减少压缩机离线时的排放量”一文）。活塞杆采用碳化钨作为涂层，需要多花费 1 000～2 000 美元。镀铬涂层同样也被用来减少磨损。

★ **采用三个环形活塞杆密封装置。**如图 2 所示，三个环形结构的活塞杆密封装置正在广泛普及。密封环一般安装在最后两个密封皮碗中的其中一个内。这种布局的主要好处在于安装此设备无需更换或更改密封箱罩的结构。

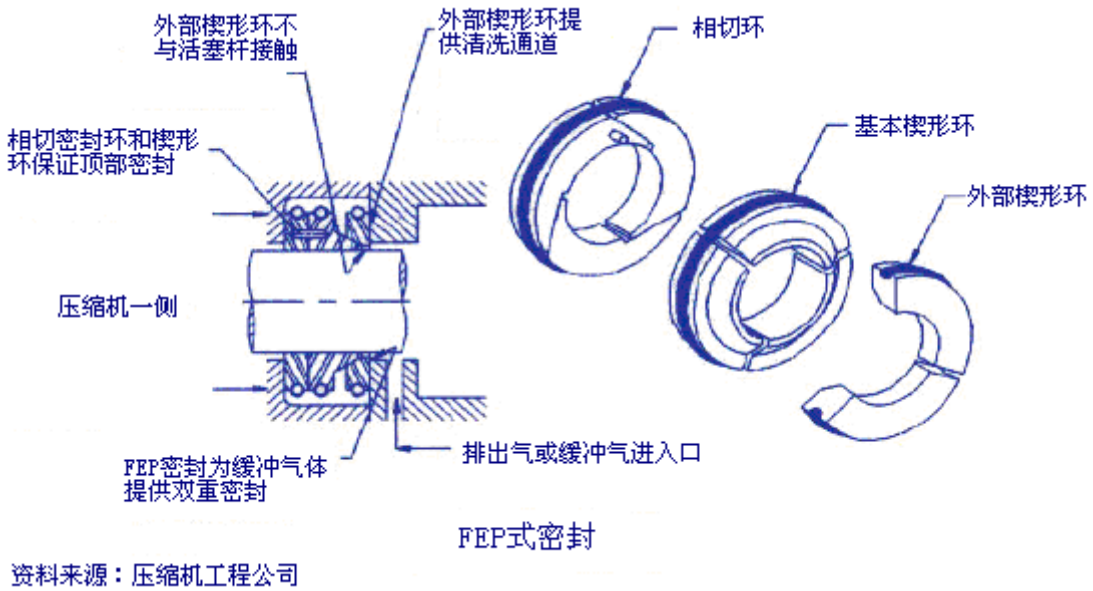

图 2　三个环形结构的不稳定排放活塞杆密封系统

6 经验总结

合作伙伴发现，为压缩站操作人员提供一些简单的、经济地更换往复式压缩机活塞杆和活塞杆密封系统的技术指南能极大地减少甲烷排放量。节省的甲烷排放费用可以补偿频繁的设备更换费用。所获得的经验如下：

- ★ 建立一个定期测量和监测活塞杆密封箱泄漏量的工作体系。定期监控润滑和冷却状态有助于减少密封环的磨损。在高温工作条件下，导热性能差是导致密封环性能恶化的重要原因。
- ★ 为新的活塞杆和新的密封环确定一个基准线初始泄漏（IL）速度，并根据工作条件、压缩机型号和压缩机尺寸进行分类管理。
- ★ 与其他压缩站共享基准线泄漏速度数据，为没有采集到某些特定数据的压缩站提供替代数据。
- ★ 为每台压缩机确定一个公司具体的排放界限，把这个排放界限作为一种有效的工具来指导现场操作人员确定何时经济有效地更换密封环和活塞杆。
- ★ 在经济合理的情况下提高活塞杆材质等级，可以减少活塞杆使用期限内的甲烷排放量。
- ★ 新型的密封环材料、新的密封类型以及完全新型的密封系统已经出现并逐步得到普及应用，产品的价值和/或环境因素抵消了高额成本的影响。
- ★ 其它信息可参考“减少压缩机离线时的排放量”一文。
- ★ 当更换密封环和活塞杆时，在天然气 STAR 计划年度报告中记录下甲烷减排量。

7 参考文献

Alastair J. Campbell, Bently Nevada Corporation, Houston, Texas. Optical Alignment of Reciprocating Compressors.

Borders, Robert, C. Lee Cook, Louisville, Kentucky, personal contact.

France Compressor Products. Mechanical Packing-Design and Theory of Operation, Bulletin 691.

Miniot, Joe, Compressor Engineering Corporation, Houston, Texas, personal contact.

Parr, Robert, TF Hudgins, Houston, Texas, personal contact.

Pipeline & Gas Journal, “Compressor Shutdown Leakage,” December 1985.

Pipeline Research Committee International, Cost-Effective Leak Mitigation at Natural Gas Transmission Compressor Stations, PR-246-9526, August 1999.

Schroeder, David M., France Compressor Products, Newtown, Pennsylvania, personal contact.

11 Tingley, Kevin, U.S. EPA Natural Gas STAR Program, personal contact.